

Jahresbericht 2001, 15. Dezember 2001

GEMISCH-AUFBEREITUNG IM BRENNRAUM PFLANZENÖLBETRIEBENER DIREKT EINGESPRITZTER DIESELMOTOREN "SYSTEM MAHLER"

Autor und Koautoren	Prof. Dr. W. Schlachter, J. Burkart
beauftragte Institution	Fachhochschule Aargau
Adresse	Klosterzelgstrasse, 5210 Windisch
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 462 45 05, w.schlachter@fh-aargau.ch , http://www.fh-aargau.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	
Dauer des Projekts	1. Nov. 1999 bis 31. Okt. 2001

ZUSAMMENFASSUNG

Der Gebrauch von unverestertem Pflanzenöl als Brennstoff für den Betrieb von Traktoren mit Dieselmotor stösst in landwirtschaftlichen Betrieben auf Interesse, da eigene Produkte ohne weitere Behandlung verwendet werden können. Es konnte mit Prüfstandsversuchen gezeigt werden, dass nach System Mahler modifizierte Motoren mit unbehandelten Pflanzenölen betrieben werden können. Der Mahler-Motor weist einen in den Zylinderkopf unter dem zurückgesetzten Einlassventil eingearbeiteten Brennraum auf. Der Brennraum im Kolben entfällt. Die Einspritzung erfolgt annähernd tangential an zwei gegenüberliegenden Stellen des zylindrischen Brennraumes.

In einem zweijährigen Projekt wurden Versuche in einer Verbrennungszelle zur Sprayausbreitung durchgeführt (PSI). Die Situation in dieser Zelle wurde mit einem ergänzten KIVA Code berechnet und verglichen (ETH). Die Modellierung wurde anschliessend auf den Mahler-Motor angewendet und so das Einspritzsystem auf Minimierung der Abgasemissionen (NO_x, CO, HC) optimiert.

An der *Fachhochschule Aargau* wurde ein 1-Zylinder und ein 4-Zylinder Motor nach diesen Erkenntnissen umgebaut und auf dem Prüfstand ausgemessen.

Die Resultate zeigen, dass die Projektziele (einwandfreier Betrieb mit Rapsöl und Einhaltung zukünftiger Abgasvorschriften TAFV 2 / VTS Stufe 2) erreicht sind. Aus diesem Grund steht der Einleitung der Projektphase 2 mit Feld- und weiteren Prüfstandsversuchen nichts im Weg.

Projektziele

- Die einwandfreie Funktion mit unverändertem Pflanzenöl betriebener Motoren ist auf dem Prüfstand nachgewiesen
- Heutige und in nächster Zukunft eingeführte Emissionsvorschriften (NO_x, UHC, CO) sind erfüllt
- Die Voraussetzung für eine erfolversprechende Inangriffnahme der Feldversuche mit Traktoren (= Phase 2) sind geschaffen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

EINLEITUNG

Vorversuche haben gezeigt, dass Motoren nach System Mahler mit unverestertem Pflanzenöl betrieben werden können, dass jedoch heutige und absehbare Abgasnormen nicht erfüllt werden. Das Erreichen der Projektziele erfordert deshalb die Optimierung der Einspritzanordnung für mit dem System Mahler ausgerüsteten Motoren. Zu diesem Zweck wurde das Sprayverhalten beim Einsatz von Pflanzenöl in der Hochtemperatur-Hochdruckzelle (HTDZ) am *Paul Scherrer Institut* für verschiedene Anfangs- und Randbedingungen experimentell untersucht (s. Jahresbericht 2000) und am *Labor für Verbrennungsmotoren* der *ETHZ* numerisch simuliert. Mit weiteren Simulationen wurde versucht, das Verhalten von umgerüsteten Motoren zu erklären. Diese grundlagenorientierten Arbeiten ermöglichten die Optimierung des Einspritzsystems und der Einspritzbedingungen. An der *Fachhochschule Aargau* wurden Versuche mit zwei handelsüblichen auf das System Mahler umgebauten Motoren durchgeführt.

MODELLRECHNUNGEN AN DER ETH

Der Projektteil Simulation – durchgeführt am *Laboratorium für Verbrennungsmotoren und Verbrennungstechnik der ETHZ* – beinhaltet dreidimensionale reaktive Strömungssimulationen mit einer am Laboratorium weiterentwickelten Version der Software *KIVA-III*. Die Stoffwerte von Rapsöl wurden grösstenteils mittels approximativer Verfahren bestimmt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte eine starke Abhängigkeit von der Viskosität. In der Literatur sind für Pflanzenöl (bzw. Rapsöl) lediglich Viskositätsdaten bei tiefen Temperaturen (-20 bis 100 °C) bekannt. Es mussten daher zusätzliche Messungen bei höheren Temperaturen durchgeführt werden. Analog mussten weitere Daten wie Verdampfungsenthalpien, Verdampfungsdrücke, Reaktionsraten für die einzelnen Fraktionen ermittelt werden. Mit den so eruierten Stoffwerten wurden in einer ersten Phase Simulationen für die unbewegte Geometrie in der HTDZ, ausgerüstet mit zwei verschiedenen Düsen ($\varnothing = 150 \mu\text{m}$, bzw. $380 \mu\text{m}$ für die Brennstoffe Diesel und Rapsöl), durchgeführt. Der Vergleich mit den am *PSI* ermittelten experimentellen Resultaten ergibt, dass sich die räumliche Verteilung des flüssigen Brennstoffs im Spray durch Kalibrierung der entsprechenden Modellparameter gut reproduzieren lässt. Die Penetration des verdampften Brennstoffes wird jedoch durch die Theorie unterschätzt, wie in Abbildung 1 ersichtlich ist. Die untenstehende Druckkurve (Abbildung 2) zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung der Simulation mit dem Experiment.

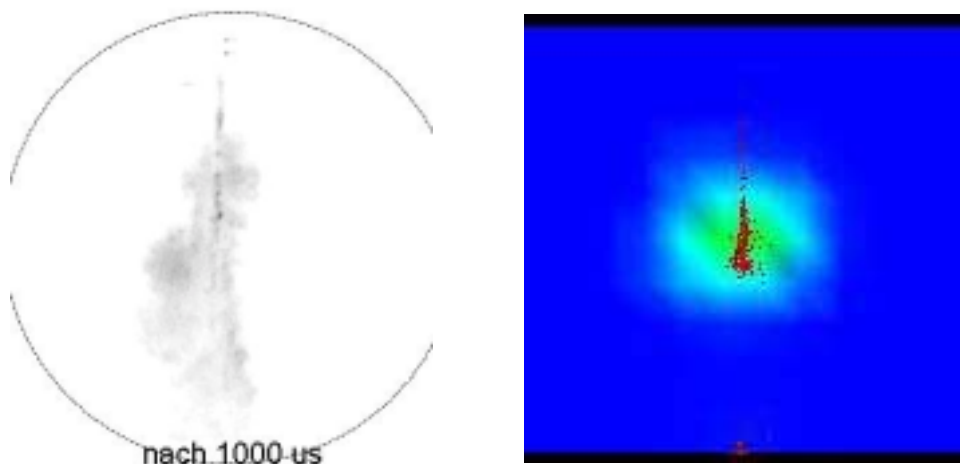


ABBILDUNG 1 – BRENNENDER RAPSÖLSPRAY, VERGLEICH EXPERIMENT (LINKS) / SIMULATION (RECHTS); 300µm DÜSE, 1000 µs NACH EINSPRITZBEGINN DER HAUPT-EINSPRITZUNG, 1000bar EINSPRITZDRUCK

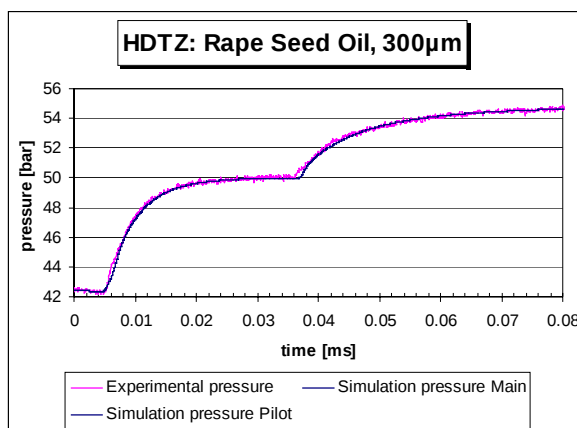


ABBILDUNG 2 – VERGLEICH SIMULATION UND EXPERIMENT: DRUCKVERLAUF HTDZ 300µm DÜSE, RAPSÖL

In einem zweiten Schritt erfolgten Simulationen zur Auslegung der Einspritzdüsen für die zwei auf das *System Mahler* umgerüsteten Motoren. Sowohl beim Einzylinder-Motor von *Lister-Petter* wie auch beim Vierzylinder-Motor von *Same-Deutz Fahr AG* konnten Daten für die Durchführung von Motorversuchen bereitgestellt werden, welche zu den auf Grund dieser Berechnungen erhofften Leistungswerte führten.

Die ursprünglich vorgesehenen Vergleiche von motorischen Simulationen mit experimentellen Daten konnten in Ermangelung einspritzzeitiger Randbedingungen (Einspritzbeginn, -Dauer und einer über die Zeit aufgelöste Einspritzrate) und den für eine Feinanpassung der Simulation notwendigen experimentellen Daten (Druckverläufe und Wärmeentwicklungen) nicht durchgeführt werden. Ein mittels Einspritznockenhub approximiertes Einspritzprofil gestattete jedoch, mit reiner Simulation am umgerüsteten *Lister-Petter* Motor vergleichend der Fragestellung nachzugehen, wie sich eine höhere Brennstofftemperatur (nach längerem Betrieb des Motors) auf den Verbrennungsprozess auswirken wird. In Abbildung 3 sind zum Zeitpunkt 5° KW nach dem oberen Totpunkt Brennraten dargestellt. Insgesamt betrachtet können die Messungen mit den aus der Simulation gewonnenen Erkenntnissen jedoch nicht untermauert werden. Dies muss jedoch nicht

zwangsläufig auf Unzulänglichkeiten der Simulation gründen. Es ist eher denkbar, dass infolge der starken Erwärmung des luftgekühlten Zylinderkopfes der Liefergrad abgenommen hat.

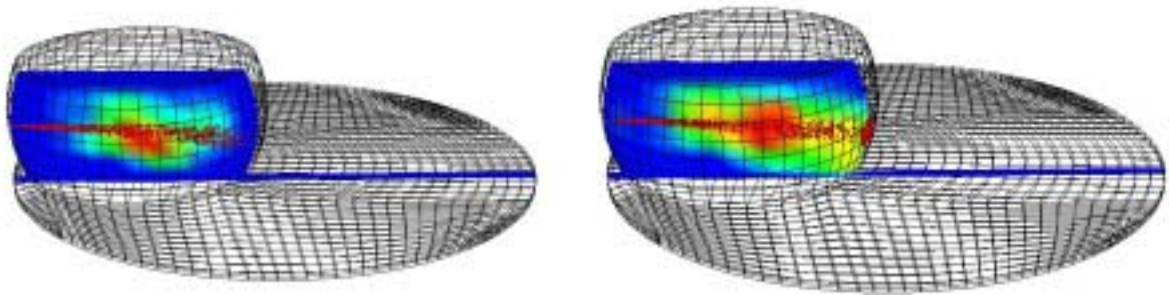


ABBILDUNG 3 – VERGLEICH BRENNRATEN FÜR 360K (LINKS) UND 390K (RECHTS) BRENNSTOFFTEMPERATUR AM DÜSENAUSTRITT; 5° KURBELWINKEL NACH OT, SCHNITT DURCH EINE SPRAYACHSE.

MOTORVERSUCHE AN DER FACHHOCHSCHULE AARGAU (FHA)

Die im *PSI* und an der *ETH* experimentell und theoretisch ermittelten Befunde wurden an der *FHA* erst an einem leicht modifizierbaren 1-Zylinder-Dieselmotor und dann an einem modernen 4-Zylinder *Same*-Traktormotor umgesetzt.

Am 1-Zylinder-Motor wurde der qualitative Einfluss von Düsengeometrie, Einspritzwinkel und Einspritzzeitpunkt auf die Verbrennung ermittelt. Aus den Befunden von *PSI*, *ETH* und Versuchen mit dem 1-Zylinder Motor wurde ein neuer Zylinderkopf für den handelsüblichen *Same-Motor 1000.4 AT* gefertigt. Nach einer Referenzmessung dieses Motors im Dieselbetrieb wurde er nach *System Mahler* umgebaut und im Pflanzenölbetrieb ausgemessen.

Zu Projektbeginn lagen Zweifel vor, ob die Spülung der Brennkammer mit einem Abgasturbolader infolge höheren Abgasgegendruckes ausreichend sei. So wurde zunächst ein mechanischer Lader gesucht. Die Firma *SIG* stellte dann freundlicherweise einen Prototypen ihres mechanisch angetriebenen Spiralladers zur Verfügung. Somit wurde der Motor in 3 Betriebsarten gemessen: Saugmotor (SM) und die aufgeladenen Versionen mit Abgasturbolader (ATL) und G-Lader (GL).

Erkenntnisse:

Die durch den tieferen Heizwert vorgegebene Leistungsreduktion beim Rapsölbetrieb ist in den oberen Drehzahlbereichen höher ausgefallen und liegt bei tiefen Drehzahlen im erwarteten Bereich (s. Abbildung 4). Dies ist eine Folge davon, dass Rapsöl eine tiefere Verbrennungsgeschwindigkeit aufweist als Dieselöl. Dies verdeutlicht sich dann auch in den viel höheren Drehmomentanstiegen beim Rapsölbetrieb (s. Tabelle 1).

Drehmomentanstieg = (max. Drehmoment – Nenndrehmoment)/Nenndrehmoment

	SM	ATL	GL
Rapsöl	23,5%	27,2%	36,6%
Diesel	13,0%	17,8%	25,7%

TABELLE 1 – DREHMOMENTANSTIEG

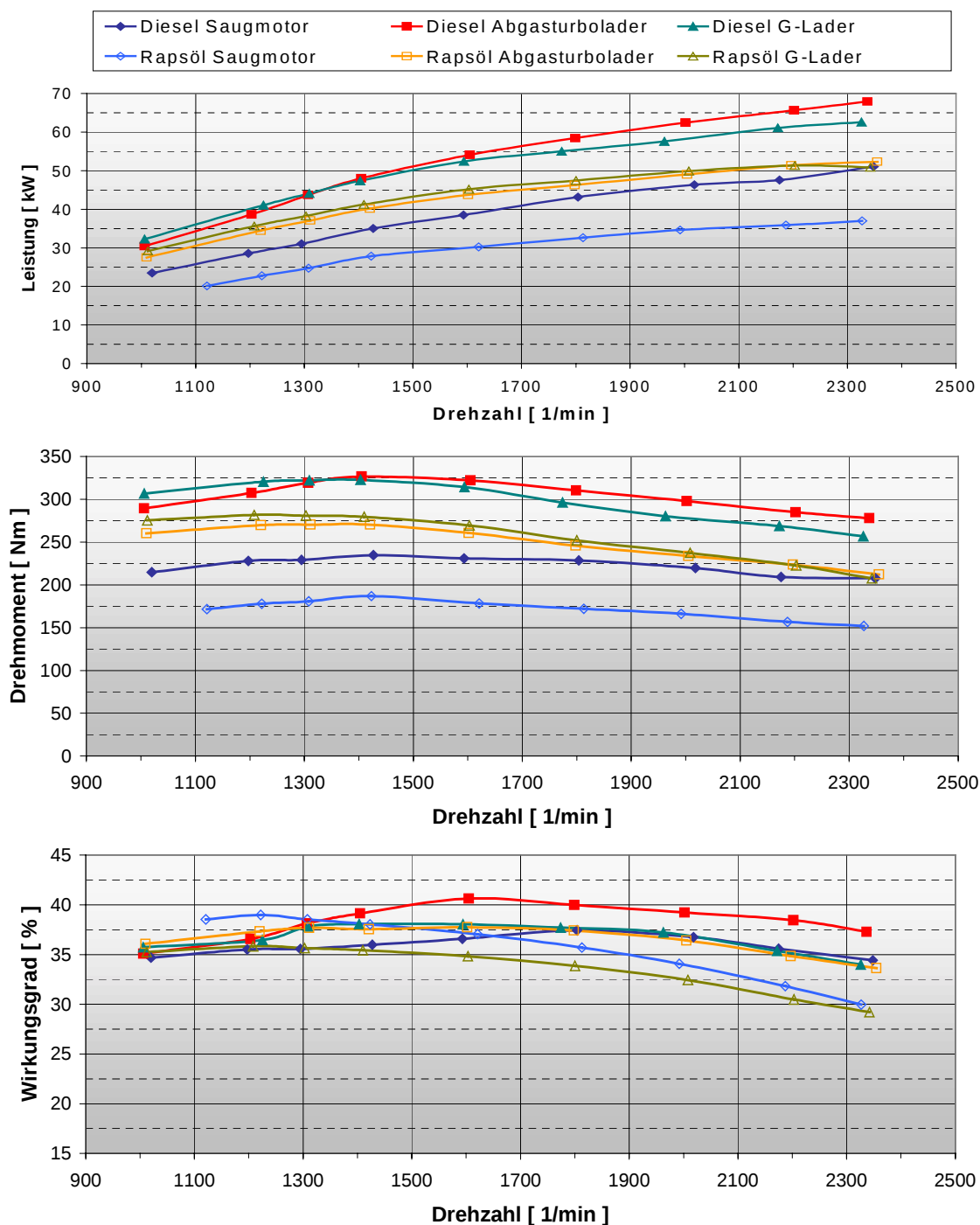


ABBILDUNG 4 – VOLLSTADTKENNLINIEN DER VERSCHIEDENEN KONFIGURATIONEN FÜR LEISTUNG, DREHMOMENT UND WIRKUNGSGRAD

Die Abgaswerte im ISO 8-Stufentest (s. Abbildung 5) liegen unter den ab Anfang 2004 geforderten Grenzwerten für Landwirtschaftsfahrzeuge (TAFV 2 / VTS Stufe 2), mit Ausnahme des Saugmotors ohne Katalysator (CO über und NO_x weit unter Limit). Mit einer (nicht durchgeführten) Veränderung des Einspritzzeitpunktes ist zu erwarten, dass beide Grenzwerte auch mit Saugmotor ohne

Katalysator erreicht werden können. Vergleichsmessungen mit dem Motor an der *Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT)* in Tänikon TG bestätigten die Ergebnisse der Versuche an der *FHA*.

Die Partikelmassen, abgeschätzt aus den Partikelmessungen, liegen beim Rapsöl deutlich tiefer als beim Dieselöl und unter dem Grenzwert von 4g/kWh. Aus der Mengen-Grössenverteilung ist ersichtlich, dass anhand der Partikelkonzentrationen der Motor mit Rapsöl nur im Saugbetrieb dem Diesel überlegen ist. In GL- und ATL-Betrieb ergeben sich mit Raps höhere Konzentrationen.

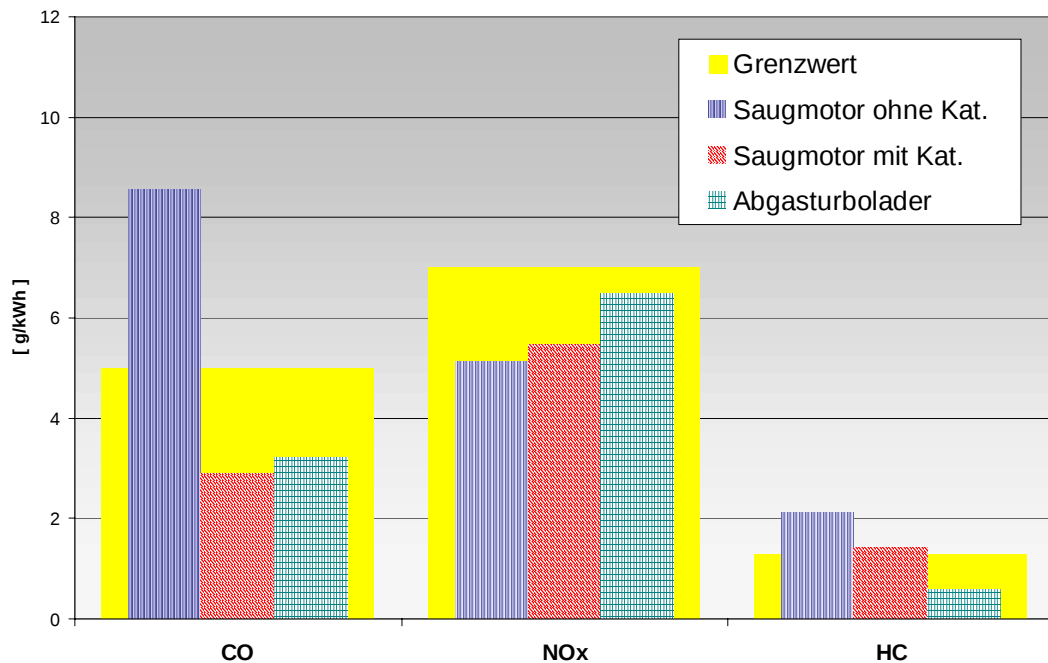


Abbildung 5 – Abgaswerte für Rapsöl nach ISO 8178 8-Stufentest (Grenzwerte für Landwirtschaftsfahrzeuge, TAFV 2 / VTS Stufe 2, gültig ab Anfang 2004)

Nationale Zusammenarbeit

Das vorliegende Vorhaben ist ein Beispiel für die Zusammenarbeit verschiedener Institutionen mit Übergang von Grundlagenforschung in die Praxisanwendung:

- ETH und PSI mit grundlagenorientierten Arbeiten
- Fachhochschulen (FH Aargau in Windisch, Hochschule für Landwirtschaft in Zollikofen) und Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) mit umsetzungsorientierten Arbeiten
- Same-Deutz Fahr AG und W. Mahler AG als Wirtschaftspartner, die gewillt sind, die gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis einzusetzen.

Ergebnisse aus diesem Vorhaben wurden an zwei Jahrestagungen der Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV), am 13. Oktober 2000 und 5. Oktober 2001, vorgestellt.

Internationale Zusammenarbeit

Folgende internationale Kontakte wurden wahrgenommen:

- Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der Technischen Universität München, Arbeitsgruppe Pflanzenöle (Dr. B. Widmann): Stoffdaten über Pflanzenöle und Standardisierung von Pflanzenöl als Kraftstoff
- Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim, Dipl. Ing. K. Maurer: Beurteilung des Einsatzes von Pflanzenölen für motorische Zwecke in Deutschland, namentlich im Rahmen des 100 Schlepperprogramms.
- Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Technische Fakultät, Universität Erlangen - Nürnberg, Dr. M. Veclas: Untersuchung des Verbrennungsverhaltens in Porenbrennräumen.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Die Ergebnisse der Experimente in der HTDZ am PSI und der numerischen Simulationen am LVV der ETHZ haben die Richtung für die Optimierung des Einspritzsystems aufgezeigt. Durch Variation verschiedener Parameter (vor allem Einspritzzeitpunkt, Düsenstellung, Düsengrösse und Abspritzdruck) am 1-Zylinder Motor konnte eine erfolversprechende Konfiguration für die Erprobung am 4-Zylinder Same-Motor identifiziert werden. Die Ergebnisse mit diesem Motor auf den Prüfständen der FH Aargau und der FAT haben den Nachweis erbracht, dass alle gesteckten Projektziele erreicht sind.

Es muss nun noch der Nachweis erbracht werden, dass sich die nach System Mahler umgebauten Motoren im praktischen Einsatz in der Landwirtschaft bewähren. Diese Arbeiten sind Gegenstand der Phase 2, die unter der Projektleitung der Hochschule für Landwirtschaft der Berner Fachhochschule (Prof. M. Meyer) stehen wird.

Referenzen

- [1] **6. Sitzung des LTV-Arbeitskreises „Dezentrale Pflanzenölgewinnung“** mit dem Thema „Standardisierung von Pflanzenöl als Kraftstoff“ vom 23.05.2000, Kontaktadresse: Bayer. Landesanstalt für Landtechnik, Vöttinger Strasse 36, D-85354 Freising
- [2] **Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht**, Bayer. Landesanstalt für Landtechnik, s. [1]
- [3] **Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke**, VDI Berichte 1126, VDI Verlag
- [4] **Internetseite General Energy Department, Combustion Research Laboratory des PSI**, <http://rag.web.psi.ch/index.html>
- [5] Wright, Y. M.: **Pflanzenöl-Simulationen**, ETH Zürich, LVV, Oktober 2001
- [6] Di Pietro, M.: **Nutzung von Pflanzenöl in direkt eingespritzten Dieselmotoren (System Mahler) Referenzmessung Diesel**, Fachhochschule Aargau, Semesterarbeit 2001, 13. Juli 2001
- [7] Di Pietro, M.: **Untersuchungen am Pflanzenölmotor System Mahler**, Fachhochschule Aargau, Diplomarbeit 2001, 30. November 2001
- [8] Burkart, J.: **Projekt Pflanzenölmotor Motorenversuche**, Fachhochschule Aargau, November 2001